



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut
Metsakasvatuse ja metsaökoloogia õppetool

Neeme Lõhmus

**HARVENDUSRAIE MÕJU PUUDE JÄMEDUSKASVULE
NING SÜSINIKUVARUDELE JA -VOOGUDELE
PALUMÄNNIKUS**

THE EFFECT OF THINNINGS ON DIAMETER INCREMENT
OF TREES AND CARBON STORAGES AND FLUXES IN
MESOTROPHIC SCOTS PINE (*PINUS SYLVESTRIS*) STAND

Magistritöö
Metsamajanduse õppekava

Juhendajad: teadur Jürgen Aosaar
professor Veiko Uri
dotsent Maris Hordo

Tartu 2018

| | | | |
|--|--------------|---------------------------|------------|
| Eesti Maaülikool | | Magistritöö lühikokkuvõte | |
| Kreutzwaldi 1, Tartu 51006 | | | |
| Autor: Neeme Lõhmus | | Õppekava: Metsamajandus | |
| Pealkiri: Harvendusraie mõju puude jämeduskasvule ning süsinikuvarudele ja -voogudele palumännikus | | | |
| Lehekülgi: 33 | Jooniseid: 4 | Tabeleid: 8 | Lisasid: 0 |
| Osakond / Õppetool: Metsakasvatuse ja metsaökoloogia õppetool | | | |
| ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: 1.5 metsateadus (B430 Metsakasvatus, metsandus, metsandustehnoloogia) | | | |
| Juhendaja(d): Teadur Jürgen Aosaar, professor Veiko Uri, dotsent Maris Hordo | | | |
| Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu, 2018 | | | |
| <p>Õigeaegselt tehtud hooldusraiete abil on võimalik kujundada produktiivsem ja kvaliteetsemat puitu tootev mets, harvendusraietega on võimalik parandada metsade süsiniku sidumise võimet ning seeläbi leevendada kliimamuutusi. Käesoleva töö eesmärgiks on selgitada harvendusraie mõju puude jämeduskasvule ning puistu süsinikuvarudele ja -voogudele 27-aastases mustikamännikus. Töö on osa RMK teadusprojektist „Raiete mõju metsade süsinikuringele“.</p> <p>Rajati kõrvuti kaks 0,09 ha suurust proovitükki, ühel tehti harvendusraie ning teine jäeti kontrollalaks. Raie teostamise hetkel oli puistu 25-aastane. Harvendusraie mõju hinnati mudelpuude meetodil ning puursüdamike abil kaks aastat pärast raiet. Peenjuurte biomassi ja produktsiooni hinnati mullamonoliitide põhjal ja varisevoogu varisekogujatest võetud proovide alusel.</p> <p>Harvendatud proovitüki puude jämeduskasv püsis 2016. aastal raie-eelsega samal tasemel ning suurenes teisel raiejärgsel aastal, seevastu kontrollala puude diameetri juurdekasv on viimasel kolmel aastal langenud. Mäni peenjuurte produktsioon ühe puu kohta oli kaks aastat pärast raiet harvendatud alal 0,70 kg, mis on enam kui kaks korda suurem kontrollala omast (0,29 kg). Varisevooga jõudis mulda süsinikku harvendamata alal 1,83 t ha⁻¹ ning harvendatud alal 1,44 t ha⁻¹.</p> | | | |
| Märksõnad: <i>Pinus sylvestris</i> , biomass, produktsioon, süsinik, mudelpuu, harvendusraie | | | |

| | | | |
|--|------------|-------------------------------|---------------|
| Estonian University of Life Sciences | | Abstract of Master's Thesis | |
| Kreutzwaldi 1, Tartu 51006 | | | |
| Author: Neeme Lõhmus | | Curriculum: Forest management | |
| Title: The effect of thinnings on diameter increment of trees and carbon storages and fluxes in mesotrophic Scots pine (<i>Pinus sylvestris</i>) stand | | | |
| Pages: 33 | Figures: 4 | Tables: 8 | Appendixes: 0 |
| Department / Chair: Chair of Silviculture and Forest Ecology | | | |
| Field of research and (CERCS) code: 1.5 forest sciences (B430 silviculture, forestry, forest technology) | | | |
| Supervisors: Researcher Jürgen Aosaar, professor Veiko Uri, associate Professor Maris Hordo | | | |
| Place and date: Tartu, 2018 | | | |
| Timely commercial thinnings can increase stand growth, quality of stemwood, and the forest's ability to store more carbon and therefor relieve climate changes. The aim of this thesis was to study the effect of the thinning on the trees' radial growth and carbon stocks and -fluxes in 27-years old pine stand growing on <i>Myrtillus</i> site type . This study is part of research project (RMK) „ Effect of clearcut and thinning on forest carbon cycling “. | | | |
| The study was based on two experimental plots with area of 0,09 ha (thinned vs. unthinned control plot). The thinning was carried out in 2015 when the stand was 25-years old. The effect of the thinning was estimated 2 years after the thinning using model tree method and increment cores from 15 trees from each plot. Fine-root biomass and production was estimated with sequential coring method and litter fluxes using samples taken from litterfall traps. | | | |
| The radial growth of the trees on the thinned plot stayed stable in 2016 and increased in 2017, but decreased on the control plot during last 3 years. Pine's fine root production on tree level was 0,70 kg (two years after the thinning), which is more than twice as on the unthinned control plot (0,29 kg). Annual organic carbon flux to soil through litter was 1,83 t ha ⁻¹ on control plot and 1,44 t ha ⁻¹ on the thinned plot. | | | |
| Keywords: Biomass, production, carbon, model tree, commercial thinning | | | |

SISUKORD

| | |
|---|----|
| 1. SISSEJUHATUS | 5 |
| 2. MATERJAL JA METOODIKA..... | 8 |
| 2.1 Katseala iseloomustus..... | 8 |
| 2.2 Puude maapealse biomassi ja produktsiooni hindamine | 9 |
| 2.3 Varis..... | 13 |
| 2.4 Puude peenjuurte ja alustaimestiku juurte biomassi ja produktsiooni hindamine..... | 13 |
| 2.5 Puude jämejuurte biomassi ja produktsiooni hindamine | 15 |
| 3. TULEMUSED JA ARUTELU | 16 |
| 3.1 Puude maapealne biomass ja produktsioon ning sellesse seotud süsinik..... | 16 |
| 3.2 Puude jämeduskasvu reageerimine harvendusraiele | 19 |
| 3.3 Süsinikuvoog mulda läbi varise..... | 20 |
| 3.4 Juurte biomass ning süsiniku akumulatsioon selles, süsiniku voog mulda läbi juurevarise | 21 |
| KOKKUVÕTE | 26 |
| KASUTATUD KIRJANDUS | 27 |
| LISAD | 32 |
| Lisa 1. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta | 33 |

1. SISSEJUHATUS

Metsad mängivad suurt rolli Maa atmosfäärist süsiniku sidumisel ning seetõttu on metsade süsinikuringega seotud temaatika oluline uurimisteema teadlastele kogu maailmas. Suur osa kasvuhoonegaasidest on tekkinud fossiilsete kütuste põletamise tagajärjel ning hinnanguliselt 35% süsihappegaasi (CO₂) kontsentratsiooni tõusust moodustab maakasutusest pärinev süsihappegaas (Foley *et al.* 2005). CO₂ on üks kasvuhoonegaasidest, mille hulk atmosfääris pidevalt suureneb ning see võib endaga kaasa tuua suuri kliima- ja keskkonnamuutusi. Viimastel aastatel on CO₂ kontsentratsioon atmosfääris olnud stabiilselt üle 400 ppm-i (Earth System Research Laboratory). Selleks, et atmosfääris CO₂ hulga suurenemine peatada, tuleb leida võimalusi süsiniku (C) sidumise suurendamiseks ning C emissioonide vähendamiseks. Metsad on olulised C sidujad ning seetõttu on tähtis erinevate metsaökosüsteemide süsinikuringete uurimine. Metsad seovad umbes kolmandiku õhku paisatavast CO₂-st ja hoiavad endas enam kui 77% kogu maismaa süsinikuvarust (Watson *et al.* 2000; Neumann *et al.* 2016). Boreaalsete metsade süsinikuvarud moodustavad 49% kogu metsaökosüsteemide süsinikuvarudest. Metsades seotakse hinnanguliselt ligi 1150 Gt süsinikku (Dixon *et al.* 1994). Erinevatel andmetel võivad metsad siduda 8-33% fossiilsete kütuste põlemisel atmosfääri paisatud süsinikust. Süsiniku allokatsioon on erinevates metsaökosüsteemides erinev, see võib olla seotud rohkem puitunud biomassi (Scott *et al.* 2004; Aosaar *et al.* 2016) või mulda (Li *et al.* 2012; Uri, V. *et al.* 2014). Puitunud taimede kuivmassist ligi pool moodustab süsinik (Saarman ja Veibri 2006); ning puu kasvamise käigus seotakse puude biomassis atmosfäärset süsinikku, seega toimivad süsiniku sidujatena paremini noored ning keskealised puistud, mis kasvavad kiiremini (Laas *et al.* 2011; Uri, V. *et al.* 2017).

Metsakasvatustlikest tegevustest üks olulisemaid on hooldusraied, mille alla kuulub metsaseaduse järgi teiste seas ka harvendusraie (Metsaseadus 2006, § 28 lg 4 p 2). Metsade süsinikuringet mõjutavad mitmed tegurid, nagu näiteks mullaviljakus ja puistu liigiline koosseis (Laganière *et al.* 2010; Somogyi *et al.* 2013), aga ka erinevad majandamisvõtted,

sealhulgas harvendusraie (Jandl *et al.* 2007; Vesala *et al.* 2015). Metsaseaduse järgi on harvendusraie hooldusraie liik, mida teostatakse alates 8 cm rinnasdiameetriga puistutes ning seda kuni puistute raieküpseks saamiseni (Metsaseadus 2006, § 28 lg 4 p 2). Harvendusraiet teostatakse, et reguleerida puistu tihedust ning koosseisu, tõsta metsa väärtust ning võimaldada ära kasutada lähitulevikus välja langevate puude puitu (Metsaseadus 2006, § 28 lg 7 p 2). Seega saadakse tänu hooldusraiatele puistu raieringi jooksul enam puitu. Hooldusraie eesmärk on parandada tulevikupuude kasvutingimusi nii, et lõpuks jääksid kasvama parimate omadustega puud ning tänu sellele tõuseks puistu kvaliteet ja majanduslik väärtus. Harvendusraie järgselt saavad puud rohkem valgust ning nende võrad püsivad optimaalse pikkusega ning elujõulistena ja tänu sellele püsib või isegi suureneb puude kõrgus- ja jämeduskasv. Elusvõra pikkus ei tohiks olla vähem kui 40% männil, 50% kasel ning 50-60% kuusel terve puu pikkusest (Laas *et al.* 2011). Harvendusraiet tasub teha pigem viljakatel muldadel, kuna neis kasvukohtades annab konkurentsi vähendamine paremat efekti. Esimese raie võiks teostada, kui puistu on kasvanud veerand ning teise, kui puistu on kasvanud kolmveerand oma eeldatavast lõppraie vanusest. Hoolimata hooldusraiate olulisest mõjust puistu kasvule on teadlased veel hiljuti tõdenud, et üldiselt on majandamise mõju metsade süsiniku ringlusele vähe uuritud (Bai *et al.* 2017). Kuna looduslikud tingimused varieeruvad riigiti suuresti, on metsade majandamise paremaks planeerimiseks süsinikuringe seisukohalt väga olulised teaduslikult põhjendatud kodumaised uurimused.

Harvendusraiate mõju puistu kasvule ning süsinikuvoogudele on uuritud üle maailma. USA teadlased on tõrvikumänni (*Pinus taeda*) uurimise käigus leidnud, et harvendusraie mõjutab oluliselt aastarõngaste laiust, mõjudes kõigepealt tüve alumisele osale ning siis järjest kõrgemale edasi (Tassissa & Burkhardt 1997). Samuti on Eestis uuritud harvendusraie mõju puude diameetri juurdekasvule keskealises hariliku männi puistus. Uurimise käigus selgus, et hooldusraie positiivne mõju oli tugevam just suurematele puudele ning nendele puudele, mis raie eelselt olid kiiremakasvulisemad (Uri, V. 1994). Puude diameetri suurenemine on puistu süsiniku sidumisel oluline, kuna annab väga suure osa biomassi produktsioonist. Süsinikuvoogu mõjutab ka mulla orgaanilise aine lagunemine. Hispaanias kiirja männi (*Pinus radiata*) puistutes tehtud uurimusest nähti, et mulla orgaanilise aine lagunemise intensiivsus sõltub harvenduse tugevusest ning raie möödunud ajast (Fernandez *et al.*

2012).

Harilik mänd (*Pinus sylvestris*) on levinuim puuliik Eestis, männikute pindala on ligikaudu 700 000 hektarit ja tagavara 175 miljonit m³ (Aastaraamat Mets 2016). Lisaks võib mändi pidada majanduslikult olulisimaks puuliigiks nii Eestis kui ka Põhjamaades ning männikute majanduslikku väärtust on võimalik hooldusraiete abil veelgi tõsta. Üle 40% meie männikutest kasvab palumetsades, mis on ka parim metsatüüp kõrge kvaliteediga männipuidu kasvatamiseks. Palumetsade tüübirühma kuuluvad pohla ja mustika kasvukohatüübid (KKT) (Lõhmus 2004). Käesolevas töös uuriti harvendusraie ealist männikut mustika kasvukohatüübis, mis on kõige levinum kasvukohatüüp ning moodustab riigimetsadest kokku ligi 20%. Puistutest esinevad enamasti I-III boniteedi männikud, neis võib kasvada ka kuuske erinevates rinnetes. Palumetsad paiknevad mitmesugustel leedemuldadel, kus lõimiseks võib olla peenliiv või harvem ka saviliiv. Mullalämmastiku vähesus on puude juurdekasvu piirav tegur, selle sisalduse suurenemine suurendab ka olulisel määral mändide juurdekasvu.

Käesoleva töö eesmärgiks on selgitada harvendusraie mõju puude jämeduskasvule ja puistu süsinikuvarudele ja -voogudele 27-aastases mustikamännikus. Töö hüpoteesiks on, et harvendusraie mõjutab puistu peenjuurte produktsiooni ja varise voogu.

2. MATERJAL JA METOODIKA

2.1 Katseala iseloomustus

Käesolev töö põhineb 2015. aasta sügisel rajatud harvendusraie katsealal (Tabel 1), mis asub Põlvamaal Verioras, Põlvamaa metskonnas, kvartali IM014 eraldisel 7. Katseala koordinaatideks on N57° 58.129' E27° 20.561'. Katse rajamise hetkel oli puistu 25-aastane. Katsealale rajati kõrvuti kaks proovitükki, ühes tehti harvendusraie 2015. aastal ning teine jäi kontrollalaks, mõlema proovitüki suurus on 0,09 ha. Harvendusraie viidi läbi mootorsaagidega, raiejäätmed jäeti langile, järgatud materjal viidi välja kokkuveotraktoriga. Rinnaspindala vähenes raiega 22,8 m² ha⁻¹ pealt 17,7 m² ha⁻¹-ni. Töö autor osales väli- ning labortöödel (puistute takseerimine, mudelpuude valimine ja töötlemise protsess, varise- ning juureproovide kogumine, sorteerimine, kaalumine, tüveketaste ja puursüdame lihvimine, aastarõngaste mõõtmine). Magistritöös käsitletav on osa suuremast RMK rahastatud projektist „Raiete mõju metsade süsinikuringele“.

Tabel 1. Hariliku männi hooldusraie proovialade iseloomustus 2017. aastal

| | Kontrollala | Harvendatud ala |
|--|-------------|-----------------|
| Puistu vanus (a) | 27 | 27 |
| Proovitüki suurus (ha) | 0,09 | 0,09 |
| Keskmine kõrgus(m) | 14,2 | 13,7 |
| Rinnasdiameeter (cm) | 11,3 | 14,2 |
| Puistu tihedus (puud ha ⁻¹) | 2722 | 1178 |
| Rinnaspindala (m ² ha ⁻¹) | 27,2 | 18,8 |

2.2 Puude maapealse biomassi ja produktsiooni hindamine

Kahe harvendusraie järgse aasta jooksul (2016 ja 2017) puude biomassi fraktsionaalses jaotuses märgatavaid muutusi ei toimunud, seetõttu pole seda ka käesolevas töös hinnatud. Et mõõdetavate muutuste toimumiseks puistus kulub rohkem aega, seda on märkinud ka teised autorid (Pukkala *et al.* 2002).

Puistu maapealse osa biomassi hindamiseks kasutati mudelpuude meetodit (Bormann & Gordon, 1984, Uri, V. *et al.* 2009), mis on aja- ja töömahukas, kuid tulemused selle eest on üsna täpsed. Uuritavas puistus on puude maapealset biomassi hinnatud 2015. ja 2017. aastal. Mõlemal korral võeti nii kontroll- kui ka harvendatud alalt 3 puud, kokku 12 puud. Käesolevas töös on biomassi regressioonimudeli koostamisel kasutatud nii 2015. (Uri, M. 2016) kui ka 2017. aastal võetud mudelpuid, mis võimaldas luua täpsema mudeli. 2015. aasta mudelpuude andmeid on kasutatud 2016. aasta kevadel kaitstud bakalaureusetöös (Uri, M. 2016).

Mõlemal aastal hinnati puistute maapealset biomassi sügisel, kui puude juurdekasv ning vegetatsiooniperiood olid lõppenud ja biomassi rohkem juurde ei oleks sellel aastal kasvanud. Katsealad klupiti ülepinnaliselt 1,3 meetri kõrguselt ning mõõdetud puud jagati kolme diameetriklassi. Seejärel valiti vastavalt diameetriklassidele mõlemalt proovitükilt kolm mudelpuud nii, et kõik diameetriklassid olid esindatud. Mudelpuude valimisel jälgiti, et need ei oleks liiga proovitüki servas, eriti harvendatud alal, kuna servaepekt võinuks vähendada harvendusraie mõju.

Mudelpuud langetati võimalikult maapinna lähedalt ja puu tüvi kuni elusvõrani jaotati kaheks sektsiooniks: esimene sektsioon 0-1,3 m, teine sektsioon kuni elusvõra alguseni. Elusvõra jagati kolmeks võrdse pikkusega osaks. Kõik mudelpuu tüve kui ka elusvõra sektsioonid ning oksad kaaluti katsealal. Pärast kaalumist võeti iga sektsiooni aluselt üks ning oksavaba tüve ja elusvõra keskelt mõne sentimeetrise paksusega analüüsiketas puidu ja koore osakaalu hindamiseks. Lisaks võeti igast võrasektsioonist keskmise diameetri ja

pikkusega mudeloks, mille põhjal hinnati vastava võrasektsiooni okaste ja okste biomassi ning produktsiooni. Kuivanud okste massi hindamiseks koguti iga mudelpuu tüvelt kõik kuivanud oksad ning kaaluti. Kuivaine sisalduse määramiseks võeti laborisse igalt puult 2-3 kuivanud oksa, samuti analüüsikettad ja mudeloksad.

Edasi toimus mudelpuude fraktsioneerimine ja töötlemine laboris. Tüveketastelt eraldati puidu ja koore osakaalude määramiseks koor ning kuivaine määramiseks võeti nii puidu kui koore alamproovid. Mudeloksad esmalt kaaluti tervikuna ning seejärel fraktsioneeriti. Selleks eemaldati viimase aasta võrsed ja nendelt okkad, samuti vanemad oksad ning ka nendelt okkad. Eraldatud fraktsioonid kaaluti sektsioonide kaupa: viimase aasta võrsed, viimase aasta okkad, vanemad oksad ja vanemad okkad. Kuivanud oksad kaaluti algse niiskuse juures ja ka pärast kuivatamist 0,01 g täpsusega. Kuivaine määramiseks võeti alamproovid sektsioonide kaupa igast fraktsioonist (10-40 g). Alamproove kaaluti täpsusega 0,01 g. Järgnevalt pandi kõik alamproovid kuivatuskappi, mille temperatuur fikseeriti 65°C juurde. Proove kuivatati kuni nende kaal enam ei muutunud. Kui proovid olid saavutanud püsiva kaalu, toimus sama täpsusega kaalumine, nagu enne kuivatamist. Saadud andmete põhjal arvutati kõikide mudelpuude fraktsioonide kuivmassid.

Koos 2015. aasta mudelpuudega koostati puistu maapealse biomassi regressioonivõrrand 12-ne mudelpuu andmete põhjal. Saadud mudel kirjeldas maapealse biomassi sõltuvust rinnasdiameetrist. Kasutati allomeetrilist seost üldkujul (1).

$$y=ax^b, \tag{1}$$

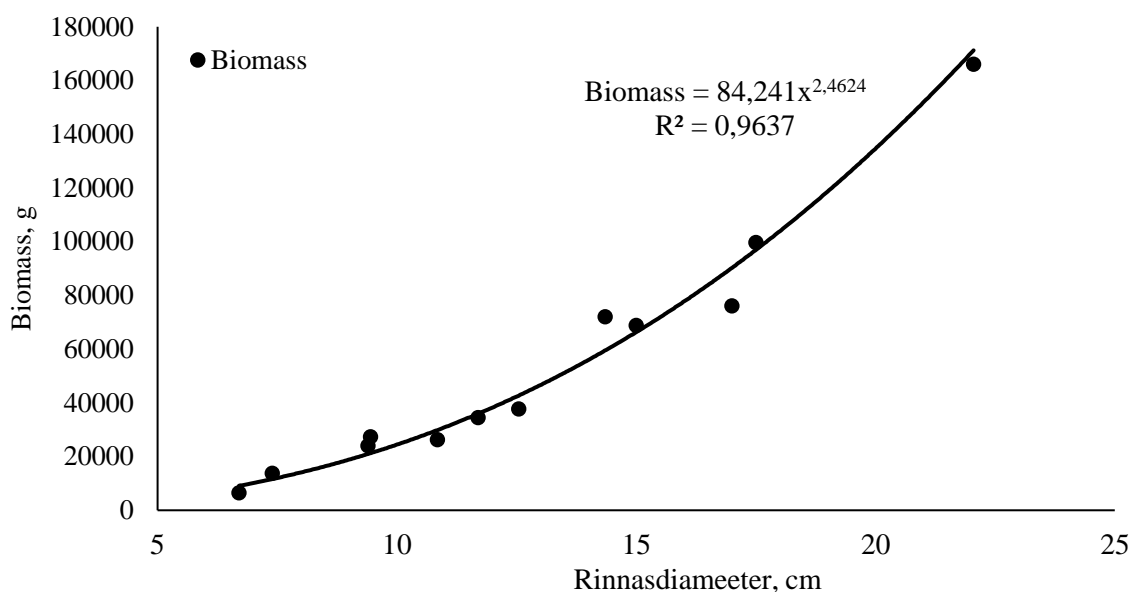
kus y – on mudelpuu maapealse osa biomass g;

x – puu rinnasdiameeter cm;

a ja b – võrrandi parameetrid.

Seos kirjeldas hästi maapealse osa biomassi sõltuvust rinnasdiameetrist, determinatsioonikordaja oli suur ($R^2 > 0,95$) (Joonis 1). Mudeli abil arvutati igale puule rinnasdiameetri põhjal biomass ning saadi vastavad massihinnangud proovitüki kohta, mis

arvutati hiljem hektari kohta. Erinevate fraktsioonide biomass arvutati vastavalt sellele, kuidas need jagunesid mudelpuudel protsentuaalselt (Tabel 3). Arvestati, et mudelpuude keskmine fraktsiooni osakaal on ka puistu puhul samaväärne. Puude viimase aasta võrsete, viimase aasta okaste ja ladva juurdekasvu biomass on võrdne produktsiooniga.



Joonis 1. Mudelpuude rinnasdiameetri ja maapealse biomassi vaheline seos 27-aastases mustikamännikus (n=12).

Puude tüvemassi produktsiooni hinnati mudelpuudelt võetud analüüsiketaste aastarõngaste mõõtmise teel. 2017. aastal võeti nii harvendatud kui ka kontrollalalt 3 puud, mis on aga liiga vähe, et saaks koostada usaldusväärseid mudeleid puude tüvemassi produktsioonide hindamiseks. Seetõttu ei saa statistiliselt usaldusväärset erinevust tõestada, küll aga saab iseloomustada suundumust. Töös esitatakse leitud tüvemasside produktsioonid ligikaudsete hinnangutena, mis siiski näitavad harvendusraie järel puude kasvus toimunud muutuste tendentsi.

Tüve kõige alumisest otsast võetud kettal (nn. nullketas) mõõdeti kõik aastarõngaste laiused

koorest säsini, et saada teada puude täpne vanus. Ülejäänud neljal tüvekettal (1,3 meetri kõrguselt, oksavaba tüve keskelt, ning elusvõra keskelt) mõõdeti viimase kolme aasta aastarõngaste laius. Enne aastarõngaste laiuste mõõtmist kettad lihviti, et aastarõngad oleks paremini nähtavad. Aastarõngaste laiused mõõdeti programmiga WinDendro 0,001 mm täpsusega. Tulemuste põhjal arvutati tüvepuidu aastane juurdekasv, kasutades Whittaker ja Woodwell (1968) valemit (2).

$$\Delta W = W_o(r^2 - (r-i)^2)/r^2, \quad (2)$$

kus ΔW on puidu kuivaine aastane juurdekasv g;

W_o - puidu kuivmass g;

r - analüüsitava ketta raadius mm;

i - kolme viimase aasta keskmine aastarõnga laius mm.

Puutüvede jämeduskasvu reageerimist harvendusraiele hinnati puursüdamikelt mõõdetud aastarõngaste laiuste põhjal. 2017. aasta oktoobris võeti kontroll- ja harvendatud alalt 15-lt puult puursüdamikud juurekaelalt kahes suunas. Võetud puursüdamikud liimiti alustele, lihviti ning tarkvara WinDendro abil mõõdeti kõikidelt puursüdamikelt viimase viie aasta aastarõngaste laiused 0,001 mm täpsusega. Tulemuste põhjal arvutati puistutele viimase viie aasta keskmine aastarõnga laius (Joonis 2). Kuna harvendusraie viidi läbi 2015. aasta sügisel, siis saab puursüdamikelt hinnata puude jämeduskasvu kolm aastat enne ja kaks aastat peale raiet. Aastaste juurdekasvude statistilist erinevust võrreldi t-testiga, kui andmed jälgisid normaaljaotust. Normaaljaotust mittejälgivate andmete puhul võrreldi keskmisi väärtusi mitteparameetrilise Mann-Whitney U testiga.

2.3 Varis

Puude maapealse varise voo hindamiseks asetati mõlemale proovitükile 2016. aasta kevadel hajali 7 varisekogujat pindalaga 0,36 m². Varist püüdis metallraamil olev polüetüleenvõrk silma läbimõõduga 1 mm. Proove koguti aprillist kuni novembrini üks või kaks korda kuus. Kuna talvisel ajal oli varise langemine vähene, võeti aprilli alguses kogu talve varis korraga. Iga varisekoguja varis pandi eraldi paberkotti ning märgistati. Hiljem asetati proovid paberkottides kuivatuskappi ning kuivatati 65 °C juures kuni püsiva kaalu saabumiseni. Varise voo leidmiseks ning varise fraktsioonide määramiseks sorteeriti see laboris: männi oksad, okkad ning muu (seemned, kooretükid, käbid, pungad). Arvestades kõigi 7 varisekoguja keskmisi fraktsioonide kuivmasse, arvutati varise voog hektari kohta harvendatud ja harvendamata alal. Varisega mulda jõudvaks süsiniku hulgaks arvestati varises seotud süsiniku kogus (Uri, V. *et al.* 2017).

2.4 Puude peenjuurte ja alustaimestiku juurte biomassi ja produktsiooni hindamine

Peenjuurte biomassi leidmiseks kasutati järjestikuste mullamonoliitide meetodikat (Ostonen *et al.* 2005). Puude peenjuurte ($d \leq 2\text{mm}$), alustaimestiku ja puhmaste juurte ning risoomide biomassi hindamiseks võeti proove 2016. aasta oktoobris ja 2017. aasta mais, augustis ja oktoobris, igal korral 15 proovi ala kohta. Proove võeti mullapuuriga, mille lõikepindala oli 11,34 cm². Proovid jagati sügavuskihtideks 10 cm kaupa (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm), asetati kaanega suletavatesse ja vastavalt markeeritud karpidesse ning toimetati laborisse, kus sügavuskihtide kaupa pesti mullast välja juured. Seejärel asetati pestud juureproovid märgistatud plastikkarpidega koos veega sügavkülma, kust hiljem sorteeriti laboris eraldi männi peenjuured (elusad ja surnud) ning puhma ja rohttaimede juured. Pärast

sorteerimist proovid kuivatati kuivatuskapis 65 °C juures stabiilse kaalu saavutamiseni ning kaaluti 0,001 grammise täpsusega. Saadud kuivkaalude ning mullapuuri lõikepindala kaudu arvutati erinevate juurefraktsioonide biomassid. Biomasside ning süsiniku kontsentratsioonide kaudu leiti juurtes oleva süsiniku varu. Juurte aastased biomassid arvutati nelja proovivõtmise korra keskmise biomassina.

Männi peenjuurte produktsioon arvutati kasutades Fairley ja Alexander (1985) otsustusmaatriksit (Tabel 2). Arvutusteks kasutati eelpool kirjeldatud nelja proovivõtmise tagajärjel leitud (peen)juurte biomasse.

Tabel 2. Peenjuurte produktsiooni arvutamise otsustusmaatriks (Fairley ja Alexander 1985)

| | | ELUS | | |
|--------|----------|---|---|---|
| | | suureneb | Väheneb | |
| | | | $\Delta B_{\text{surnud}} > \Delta B_{\text{elus}}$ | $\Delta B_{\text{elus}} > \Delta B_{\text{surnud}}$ |
| SURNUD | suureneb | $P = \Delta B_{\text{elus}} + \Delta B_{\text{surnud}}$ | $P = \Delta B_{\text{elus}} + \Delta B_{\text{surnud}}$ | $P = 0$ |
| | väheneb | $P = \Delta B_{\text{elus}}$ | $P = 0$ | |

Rohttainede peenjuurte produktsioon võrdub nende biomassiga, kuna taimed on üheaastased (Varik *et al.* 2009; Uri, V. *et al.* 2011). Puhmaste peenjuurte produktsiooni määramise puhul kasutati varasemates Soomes ja Rootsis tehtud uuringute käigus leitud männi peenjuurte käibekiirust 0,5 (Makkonen & Helmisaari; 1999; Persson 1980). Antud meetoodika on kooskõlastatud Tartu Ülikooli vanemteadur Ivika Ostonen-Märtiniga, kes peenjuurte uurimises rahvusvaheliselt tunnustatud ekspert

Puude peenjuurte ja alustaimestiku juurte kaudu mulda jõudva süsinikuvoo suuruseks võeti nimetatud juurte aastased produktsioonid ja nendesse seotud süsinik, kuna eeldatakse, et aastate jooksul on juurte suremine ja nende teke pidev protsess ning surevate ja juurde tulevate juurte massid on tasakaalus (Meyer *et al.* 2013; Varik *et al.* 2015). Süsinikusisaldus

erinevates puude fraktsioonides ja varises määrati EMÜ Taimebiokeemia Laboratooriumis.

Peenjuurte käibekiirus näitab, kui suur osa kõikidest juurtest aasta jooksul välja vahetub. See on arvutatud peenjuurte produktsiooni ning biomassi jagatisena. Käibekiiruse põhjal on arvutatud välja ka peenjuurte eluiga käibekiiruse pöördväärtusena.

2.5 Puude jämejuurte biomassi ja produktsiooni hindamine

Puude jämejuurte ($d > 2\text{mm}$) biomass arvatati, kasutades D. Silma magistritöö (2018) tulemusi, kus maa-aluse jämejuurte ja maapealse puitse (tüvi, oksad) biomassi suhe oli 19%. Helmisaari *et al.* (2002) uuringus selgub, et 35-aastases puistus oli selleks suhteks 21,7%, mis on väga lähedane tulemus. Süsiniku tagavara arvutamiseks jämejuurtes kasutati sama süsiniku kontsentratsiooni nagu tüvepuidu puhul.

Jämejuurte produktsiooni on hinnatud antud töös proportsiooniliselt maapealse osa produktsiooniga (Aosaar *et al.* 2013). Kuid kuna mudelpuude valim oli väike siis ka jämejuurte produktsiooni hinnang on indikatiivne ja kasutatud töös võimalike tulemuste üle arutlemiseks.

3. TULEMUSED JA ARUTELU

3.1 Puude maapealne biomass ja produktsioon ning sellesse seotud süsinik

Tulenevalt väljaraiest on harvendatud alal tüvepuidu biomass märkimisväärselt madalam kui kontrollalal (Tabel 3). Kaks aastat on liiga lühike ajavahemik, et allesjäänud puud suudaks katta väljaraiutud puude biomassi. Viimasel aastal juurde kasvanud okaste biomass ületas mõlemal alal vanemate okaste biomassi. Märkimisväärne on kuivanud okste suur osakaal, nende mass on samas suurusjärgus elusate okste biomassiga.

Tabel 3. Maapealse biomassi fraktsionaalne jaotus 27-aastases mustikamännikus

| Fraktsioon | Kontrollala (t ha ⁻¹) | Harvendatud ala (t ha ⁻¹) |
|----------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Tüvepuit | 65,76 | 49,55 |
| Tüvekoor | 7,71 | 5,81 |
| Vanad oksad | 7,60 | 5,73 |
| Vanad okkad | 2,53 | 1,91 |
| Viimase aasta võrsed | 1,03 | 0,78 |
| Viimase aasta okkad | 2,72 | 2,05 |
| Kuivanud oksad | 6,47 | 4,88 |
| Kokku | 93,84 | 70,71 |

Et paremini võrrelda harvendatud ja harvendamata puistute näitajaid, arvutati mõlemal ala biomass fraktsioonide kaupa keskmiselt ühe puu kohta (Tabel 4).

Tabel 4. Keskmise puu biomassi fraktsionaalne jaotus 27-aastases mustikamännikus

| Fraktsioon | Kontrollala (kg) | Harvendatud ala (kg) |
|----------------------|------------------|----------------------|
| Tüvepuit | 24,16 | 42,06 |
| Tüvekoor | 2,83 | 4,93 |
| Vanad oksad | 2,79 | 4,86 |
| Vanad okkad | 0,93 | 1,62 |
| Viimase aasta võrsed | 0,38 | 0,66 |
| Viimase aasta okkad | 1,00 | 1,74 |
| Kuivanud oksad | 2,38 | 4,14 |
| Kokku | 34,47 | 60,03 |

Harvendatud alal oli keskmise puu biomass peaaegu kaks korda suurem, kui kontrollalal (Tabel 4), kuna väiksemad allajäänud puud raiuti harvendusraie käigus välja ning see suurendab oluliselt keskmise puu biomassi harvendatud alal.

Varasemalt on uuritud mändide maapealset ja maa-alust biomassi Soome idaosas (Helmisaari *et al.* 2002), kus võrreldi 15-, 35- ja 100-aastaseid hariliku männi puistuid. Selles uurimuses erinesid 15- ja 35-aastaste männikute tüvepuidu ning elusate oksade biomassi osakaalud märkimisväärselt. 15-aastases puistus, kus kasvas 7425 puud hektari kohta, oli tüvepuidu osakaal maapealsest biomassist 33,9% ning okste osakaal 38,3%, st. et nii noores puistus ületas okste biomass isegi tüvepuidu massi. Keskealises, 35-aastases puistus aga kasvas tüvepuidu osakaal 60,0%-ni ja oksade osakakaal langes 17,6%-ni. See puistu oli ka oluliselt hõredam, puid oli hektaril 2660. Käesolevas töös uuritud 27-aastase männiku harvendamata ala tüvepuidu osakaal oli 66,1% ning oksad 8,4%, puid hektaril 2722.

Viimase aasta okaste ning viimase aasta võrsete biomass loeti võrdseks produktsiooniga, kuna need on kasvanud aasta jooksul. Kokku moodustasid need fraktsioonid kontrollalal 3,75 t ha⁻¹ ja harvendatud alal 2,83 t ha⁻¹. Puude tüveproduktsiooni hindamine toimus aastarõngaste mõõtmise teel ning arvutatud ligikaudne tüvepuidu produktsioon kontroll- ja harvendatud alal oli väga sarnane, vastavalt 3,9 t ha⁻¹ ning 4,1 t ha⁻¹. Kuigi hindamine toimus

suhteliselt väikese arvu mudelpuude põhjal, võimaldab see siiski hinnata üldist tendentsi. Seega võib harvendatud ala tüvepuidu produktsioon, vaatamata oluliselt väiksemale puude arvule olla samas suurusjärgus kontrollala tüveproduktsiooniga ning viidata harvenduse positiivsele mõjule.

Antud puistus varieerus süsinikusisaldus erinevates biomassi fraktsioonides 45,36% ja 51,91% vahel (Tabel 5). Kõige suurem süsiniku kontsentratsioon oli kuivade okste fraktsioonis ning kõige väiksem kooses. Varasemalt on Eestis uuritud erinevates vanustes mändide süsinikusisaldust biomassist fraktsioonide kaupa (Karu 2005) ning saadud tulemuseks tüvepuidus 49,4%, kooses 52,5% ning okastes 51,2%. Üldistusena võib öelda, et ligikaudu pool puistu biomassist moodustab süsinik.

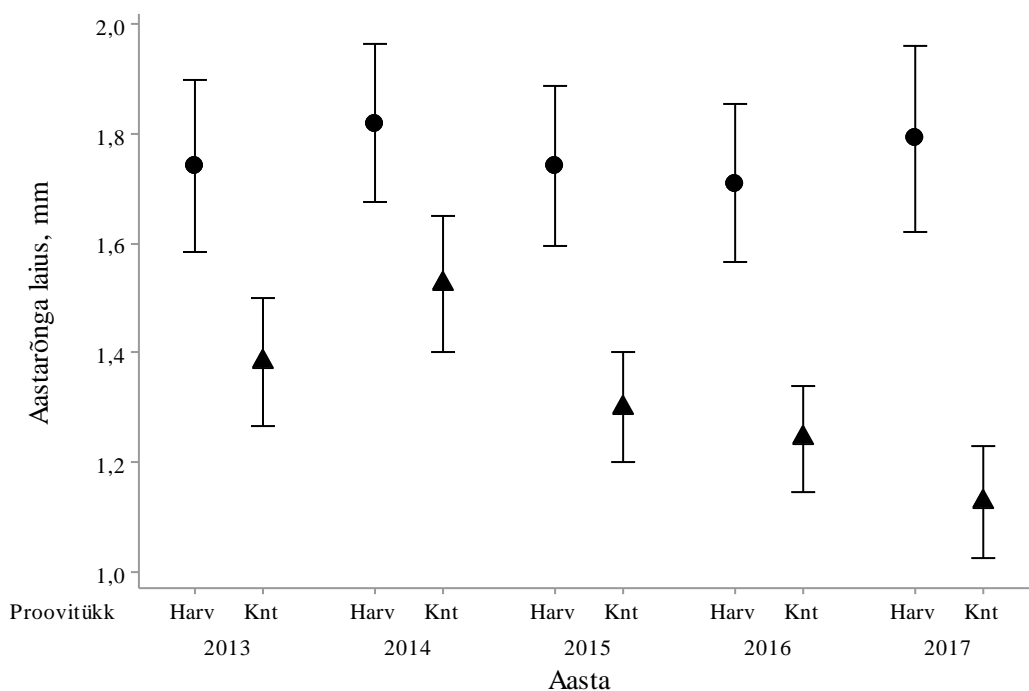
Tabel 5. Süsinikusisaldus 27-aastase mustikamänniku erinevates fraktsioonides ning kontroll- ja harvendatud alade süsiniku tagavarad

| Fraktsioon | C (%) | C tagavara (t ha ⁻¹) | |
|----------------------|-------|----------------------------------|-----------------|
| | | Kontrollala | Harvendatud ala |
| Tüvepuit | 46,84 | 30,8 | 23,2 |
| Tüvekoor | 45,36 | 3,5 | 2,6 |
| Vanad oksad | 48,56 | 3,7 | 2,8 |
| Vanad okkad | 45,62 | 1,2 | 0,9 |
| Viimase aasta võrsed | 47,92 | 0,5 | 0,4 |
| Viimase aasta okkad | 49,69 | 1,4 | 1,0 |
| Kuivanud oksad | 51,91 | 3,4 | 2,5 |
| Kokku | | 44,3 | 33,4 |

Kõige suuremad süsiniku varud on salvestatud puude tüvepuitu. Alasiseselt üsna sarnases suurusjärgus on süsinikku salvestunud mõlemal alal tüvekoorde, vanadesse okstesse ning kuivanud okstesse.

3.2 Puude jämeduskasvu reageerimine harvendusraiele

Puude jämeduskasvu uuriti mõlemalt proovialalt võetud 15-ne puu puursüdamike mõõtmistel saadud tulemuste põhjal. Statistiliselt usaldusväärne erinevus harvendatud- ja kontrollala puudelt võetud puursüdamike aastarõngaste laiuste vahel leiti 2015. (Mann-Whitney U test, $p < 0,05$), 2016. (t-test, $p < 0,05$) ja 2017. (t-test, $p < 0,05$) aastal. 2013. ja 2014. aastarõngaste laiuste keskväärtuste vahel ei leitud statistiliselt usaldusväärset erinevust (t-test, $p > 0,05$) (Joonis 2). Seega on harvendatud puistu tüve juurdekasv viimasel kolmel aastal statistiliselt oluliselt kõrgem, kui kontrollala juurdekasv.



Joonis 2. Keskmise aastarõngaste laius mustikamännikus harvendatud- (Harv) ja kontrollalal (Knt) aastatel 2013-2017. Vearivad näitavad standardviga. Harvendusraie viidi läbi 2015. aasta sügisel

Harvendatud puistu aastaste juurdekasvude omavahelisel võrdlemisel (2013 vs. 2014, 2014 vs 2015, 2015 vs. 2016 ja 2016 vs. 2017) ei leitud statistiliselt usaldusväärset erinevust keskväärtuste vahel (t-test, $p > 0,05$), seega puistu juurdekasvud on olnud ühtlased ja 2015. aastal läbiviidud harvendusraie ei ole veel usaldusväärset puistu tüve juurdekasvu kiirendanud. Samuti ei leitud statistiliselt usaldusväärset erinevust kontrollala puistu tüve juurdekasvude keskväärtuste omavahelisel võrdlemisel (T-test ja Mann Whitney U test, $p > 0,05$), seega on ka kontrollala kasv olnud uuritud perioodi jooksul ühtlane, kuid viimastel aastatel statistiliselt usaldusväärset madalam kui harvendatud proovitükil. Kuigi aastarõngaste laiuste alasisesed erinevused ei ole statistiliselt usaldusväärset, võib kontrollalal kasvavate puude aastarõngaste laiuste puhul märgata langustrendi, samal ajal kui harvendatud alal on see läbi aastate püsinud ühtlane, mida võiks pidada harvenduse mõjuks.

3.3 Süsinikuvoog mulda läbi varise

Harvendatud alal oli maapealse varise voog väiksem, kuna seal on ka tunduvalt vähem puid. Varise hulk on olnud kahel viimasel aastal harvendatud alal stabiilne, 2016. aastal $3,08 \text{ t ha}^{-1}$ ning 2017. aastal $2,92 \text{ t ha}^{-1}$, kuid kontrollalal on see muutunud üsna oluliselt, küündides esimesel aastal $4,71 \text{ t ha}^{-1}$ -ni ning vähenedes teisel aastal $3,70 \text{ t ha}^{-1}$ juurde (Tabel 6). Varasemalt on saadud Eestis 45-aastaste männipuistute aastaseks maapealse varise koguseks $2,92\text{-}4,38 \text{ t ha}^{-1}$, 30-aastasel kuusepuistus $1,17 \text{ t ha}^{-1}$ (Kasuk 2017) ning 40-aastasel sookase puistul $3,91 \text{ t ha}^{-1}$ (Möll 2015).

Tabel 6. Maapealse varise vood (t ha^{-1}) 2016. ja 2017. aastal 26- ja 27-aastases harvendatud ja harvendamata mustikamännikus

| 2016 | MA okkad | MA oksad | Muu | Kokku |
|-----------------|----------|----------|------|-------|
| Kontrollala | 2,73 | 0,83 | 1,15 | 4,71 |
| Harvendatud ala | 1,98 | 0,33 | 0,77 | 3,08 |
| 2017 | | | | |
| Kontrollala | 2,63 | 0,14 | 0,93 | 3,70 |
| Harvendatud ala | 2,26 | 0,09 | 0,57 | 2,92 |

Arvestades varise erinevate fraktsioonide süsinikusisaldusi, liikus süsinikku varisega mulda 2016. aastal kontrollalal $2,36 \text{ t ha}^{-1}$ ja harvendatud alal $1,53 \text{ t ha}^{-1}$ ja 2017. aastal vastavalt $1,83 \text{ t ha}^{-1}$ ning $1,44 \text{ t ha}^{-1}$. Seega on süsinikuvoog mulda harvendatud alal püsinud stabiilsem, kui kontrollalal. Rootsisis tehtud uuringute käigus leiti, et varisega jõudis süsinikku aasta jooksul mulda kasepuistus $0,72 \text{ t ha}^{-1}$, kuusepuistus $1,28 \text{ t ha}^{-1}$ ning männipuistus $1,37 \text{ t ha}^{-1}$ (Hansson 2011).

3.4 Juurte biomass ning süsiniku akumulatsioon selles, süsiniku voog mulda läbi juurevarise

Soomes tehtud katsealadel hinnati maa-alune biomass kolme erineva vanuseklassi männikus ning vaadeldi puude maa-aluse ja maapealse biomassi osakaalude muutusi vanuse suurenedes (Helmisaari *et al.* 2002). Selgus, et maapealse biomassi osakaal suurenes vanusega ning maa-aluse osakaal vähenes. Võrreldes 15- ja 35-aastaste puistute biomasside osakaalu suurenes vanemas puistus maapealse osa biomass 3% ja maa-aluse osa oma vähenes 3%. Nende kahe vanuse keskmised osakaalud olid puude maapealsel osal 76,5% ning maa-alusel osal 23,5%. Eestis läbi viidud uurimuse põhjal oli jämejuurte biomass 19% ilma okasteta puude maapealsest biomassist (Silm 2018). Selle suhtarvu puhul oli käesolevas töös uuritud maa-alune jämejuurte biomass kontrollalal $16,8 \text{ t ha}^{-1}$ ja harvendatud alal $12,7 \text{ t ha}^{-1}$, seega on jämejuurtesse seotud süsinikku vastavalt $8,4 \text{ t ha}^{-1}$ ja $6,5 \text{ t ha}^{-1}$. Sarnased

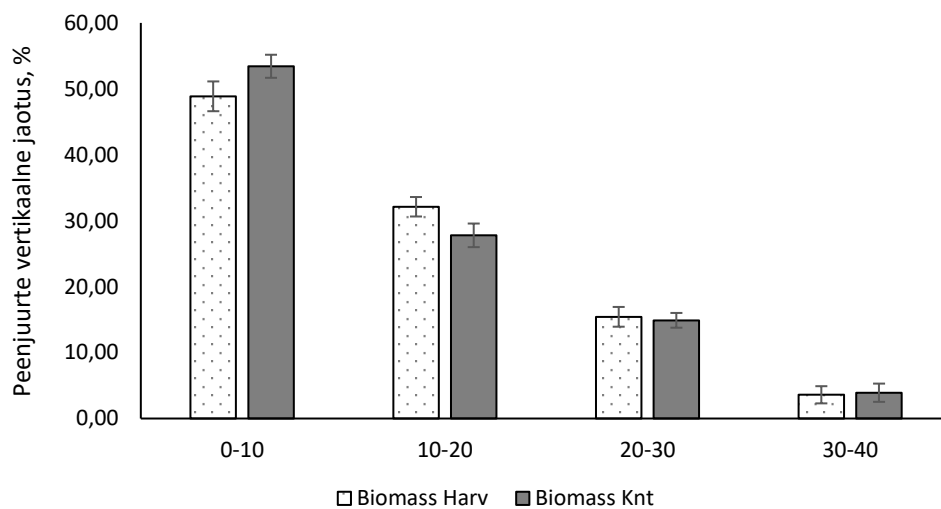
maa-aluse ja maapealse biomassi suhted on Eestis leitud ka arukase (Varik *et al.* 2013) ja halli lepa (Aosaar *et al.* 2013) kohta.

Jämejuurte produktsioonihinnang on ligikaudne, kuna jämejuurte produktsiooni arvestatakse proportsionaalselt maapealse puitunud biomassi produktsiooniga (Aosaar *et al.* 2013). Jämedate juurte ligikaudne produktsioon oli 2017. aastal nii kontroll- kui ka harvendusalal 0,8 t ha⁻¹ ja selles seoti süsinikku ca 0,3 t ha⁻¹.

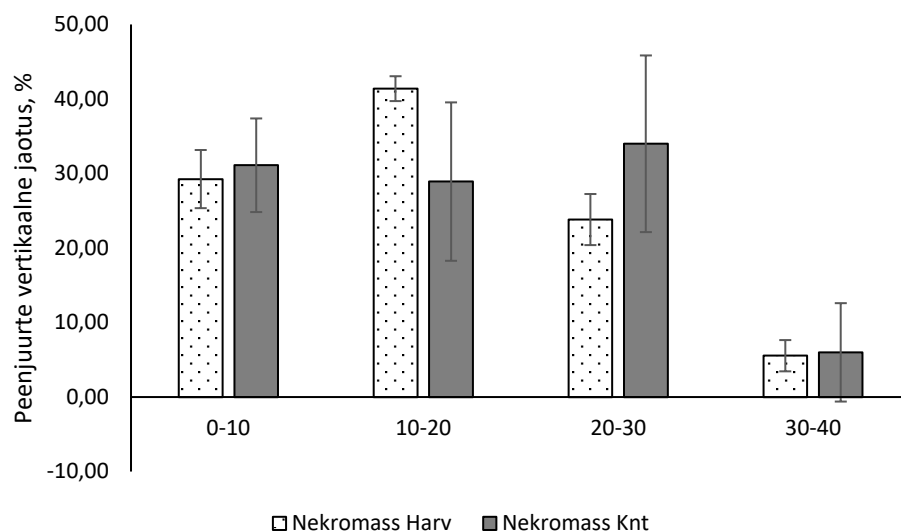
Puude peenjuured ja puhmaste juured moodustavad suure osa puistu maa-alusest biomassist. Käesolevas töös hinnati männi peenjuurte biomassiks kontrollalal 4,7 t ha⁻¹ ja harvendatud alal 2,7 t ha⁻¹, kuid puhmaste juurte biomass jääb juba alla tonni hektari kohta mõlemal alal. Helmisaari *et al.* (2002) uuringus oli 35-aastase männiku peenjuurte biomass 3,6 t ha⁻¹, mis jääb antud töös leitud tulemuste (2,7 t ha⁻¹ ning 4,7 t ha⁻¹) piiresse. 10 aastat nooremas männikus jäi peenjuurte biomass vahemikku 1,4- 2,6 t ha⁻¹ (Makkonen ja Helmisaari 2001). Rootsis on leitud harilikul männi (*Pinus sylvestris*) peenjuurte biomassiks 2,27 t ha⁻¹, arukasel (*Betula pendula*) 1,96 t ha⁻¹ ning harilikul kuusel (*Picea abies*) isegi 7,02 t ha⁻¹ (Hansson *et al.* 2013). Peenjuurte biomassi ning produktsiooni mõjutavad oluliselt keskkonnategurid, nagu mulla tekstuur, aeratsioon, niiskus, temperatuur ja juurkonkurents (Kramer ja Boyer 1995). Peenjuurte biomass käesoleva töö proovialadel oli mulla erinevates sügavuskihtides erinev, vähenedes sügavuse suurenedes (Tabel 7). Harvendatud alal ning kontrollalal paiknes kõige ülemises kihis ligi 50% peenjuurte biomassist ning teises sügavuskihis 29% (Joonis 3). Seega, ülemises 0-20 cm mullakihis kokku oli peaaegu 80% elusatest peenjuurtest. Sarnaseid tulemusi on saadud ka teiste puuliikide puhul (Finér *et al.* 2007; Helmisaari *et al.* 2007). Selle põhjuseks on toitainete paiknemine suuremal määral ülemistes mullakihtides (Ostonen *et al.* 2005; Garkoti 2011). Peenjuurte nekromassi paiknemine sügavuskihtide kaupa on välja toodud joonisel 4.

Tabel 7. Mäni peenjuurte bio- ja nekromassi jagunemine sügavuskihiti 27-aastase mustikamänniku harvendatud ja kontrollalal koos standardvigadega

| Mullakihi sügavus (cm) | Mäni peenjuurte mass (t ha ⁻¹) | | | |
|------------------------|--|-----------|-----------|-----------|
| | Biomass | | Nekromass | |
| | Harv | Knt | Harv | Knt |
| 0-10 | 1,33±0,13 | 2,52±0,23 | 0,23±0,02 | 0,29±0,06 |
| 10-20 | 0,88±0,08 | 1,29±0,11 | 0,34±0,04 | 0,27±0,03 |
| 20-30 | 0,41±0,04 | 0,69±0,06 | 0,21±0,02 | 0,31±0,04 |
| 30-40 | 0,10±0,02 | 0,19±0,06 | 0,05±0,01 | 0,06±0,01 |
| Kokku | 2,72±0,05 | 4,68±0,09 | 0,84±0,02 | 0,92±0,02 |



Joonis 3. Peenjuurte biomassi vertikaalne jaotus sügavuskihtide kaupa. Vearibad näitavad standardvigasid.



Joonis 4. Peenjuurte nekromassi vertikaalne jaotus sügavuskihtide kaupa. Vearibad näitavad standardvigasid.

Kaks aastat pärast raiet polnud männi peenjuurte ning alustaimestiku juurte produktsioon alade vahel märkimisväärselt erinev. (Tabel 8), samuti seoti juurte produktsiooni käigus sarnane kogus süsinikku.

Tabel 8. Puude peenjuurte ja alustaimestiku juurte produktsioon ja süsiniku sidumine

| Maa-alune produktsioon, t ha ⁻¹ | | | Maa-aluse osa süsiniku sidumine, t ha ⁻¹ | | |
|--|-------------|-----------------|---|-------------|-----------------|
| | Kontrollala | Harvendatud ala | | Kontrollala | Harvendatud ala |
| MA | | | MA | | |
| peenjuured | 0,79 | 0,83 | peenjuured | 0,40 | 0,42 |
| Puhma juured | 0,42 | 0,32 | Puhma juured | 0,19 | 0,15 |
| Rohttaimede juured | 0,91 | 0,97 | Rohttaimede juured | 0,40 | 0,42 |
| Kokku | 2,13 | 2,12 | Kokku | 1,26 | 1,35 |

Männi peenjuurte produktsioon ühe puu kohta oli kontrollalal 0,29 kg ning harvendatud alal kaks korda suurem – 0,70 kg, mis võib osati olla tingitud harvendusraie järel allesjäänud puudele tekkinud suurema toitepinna ja mullas oleva kasvuruumi olemasolust.

Kontrollalal oli männi peenjuurte käibekiirus 0,17 ning selle põhjal arvutatud peenjuurte eluiga 5,9 aastat. Harvendatud alal oli käibekiirus juba 0,31 ning eluiga 3,3 aastat. Kuna väljaraiutud puude juured surevad, on rohkem võimalust kasvada uutel peenjuurtel, sest peenjuurte suremus ning juurde tekkimine on tasakaalus, seetõttu ka eluiga väheneb (Meyer *et al.* 2013; Varik *et al.* 2015).

KOKKUVÕTE

Kliimasoojenemine on tänapäeval väga aktuaalne probleem. Suuresti põhjustab seda kasvuhoonegaaside suur sisaldus atmosfääris. CO₂ on üks põhilisi kasvuhoonegaase ning seetõttu on oluline uurida süsinikuvoogusid erinevates metsaökosüsteemides. Kuna metsad on maailmas olulised süsiniku sidujad, vajatakse jätkuvalt empiirilisi andmeid selle kohta, kui palju erinevad metsad süsinikku seovad ning kuidas majandamine mõjutab metsade süsinikuringet. Käesolevas töös uuriti harvendamise mõju mustika kasvukohatüübis kasvava 27-aastase männiku biomassile ning selle jagunemisele erinevatesse fraktsioonidesse.

Harvendamata alal (puistu tihedus 2722 puud ha⁻¹) oli puude maapealse osa biomass kokku 94,0 t ha⁻¹ ning harvendatud alal, kus kasvas 1178 puud, vastavalt 73,3 t ha⁻¹. Tüvemassid moodustasid puude maapealsest biomassist vastavalt 73,5 t ha⁻¹ ning 55,4 t ha⁻¹, tüvedesse salvestatud süsiniku kogused olid vastavalt 34,9 t ha⁻¹ ja 26,3 t ha⁻¹.

Puude aastarõngaste laiuste analüüs näitas, et harvendatud alal oli aastarõngaste laius viimase viie aasta jooksul usaldusväärselt kõrgem kui kontrollalal. Aastarõngaste alasisene varieeruvus aastate kaupa usaldusväärselt ei erinenud. Harvendatud alal on jämeduskasv jäänud stabiilseks, aga kontrollalal oli tendents puude jämeduskasvu vähenemisele, mis võib viidata harvenduse mõjule.

Männi peenjuurte biomass oli harvendamata alal 4,7 t ha⁻¹ ja harvendatud alal 2,7 t ha⁻¹ ning aastane produktsioon vastavalt 0,79 t ha⁻¹ a⁻¹ ja 0,83 t ha⁻¹ a⁻¹. Varisevooga jõudis süsinikku mulda harvendamata alal 1,83 t ha⁻¹ a⁻¹ ning harvendatud alal 1,44 t ha⁻¹ a⁻¹. Puude viimase aasta võrsete ning okaste produktsioonis seoti aasta jooksul süsinikku kontrollalal 1,85 t ha⁻¹ ja harvendatud alal 1,4 t ha⁻¹.

Leidis kinnitust püstitatud tööhüpotees, et harvendusraie mõjutab puistu peenjuurte produktsiooni ja varise voogu.

KASUTATUD KIRJANDUS

- Aosaar, J., Mander, Ü., Varik, M., Becker, H., Morozov, G., Maddison, M., Uri, V.** (2016). Biomass production and nitrogen balance of naturally afforested silver birch (*Betula pendula* Roth) stand in Estonia. - *Silva Fennica*. Vol. 50, No. 4, pp. 1-19.
- Aosaar, J., Varik, M., Lõhmus, K., Ostonen, I., Becker, H., Uri, V.** (2013). Long-term study of above- and below-ground biomass production in relation to nitrogen and carbon accumulation dynamics in a grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench) plantation on former agricultural land. - *European Journal of Forest Research*. Vol. 132, No. 5-6, pp. 737–749.
- Bai, S.H., Dempsey, R., Reverchon, F., Blumfield, T.J., Ryan, S., Cernusak, L.A.** (2017). Effects of forest thinning on soil-plant carbon and nitrogen dynamics. - *Plant and Soil*. Vol. 411, pp. 437-449.
- Bormann, B.T., Gordon, J.C.** (1984). Stand density effects in young red alder plantations: productivity, photosynthate partitioning and nitrogen fixation. - *Ecology*. Vol. 65. No. 2, pp. 394–402.
- Dixon, R.K., Brown, S., Houghton, R.A., Solomon, A.M., Trexler, M.C., Wisniewski, J.** (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. - *Science*. Vol. 263, Vol. 5144. pp. 185–190.
- Earth System Research Laboratory. Recent Monthly Average Mauna Loa CO₂. [veebileht] <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/index.html> (21.05.2018)
- Fairley, R.I., Alexander, I.J.** (1985). Methods of calculating fine root production in forests. In: Fitter, A.H. (Ed.). - *Ecological interactions in soil*. Special Publication Number 4 of The British Ecological Society, pp. 37–42.
- Fernandez, I., Carrasco, B., Cabaneiro, Álvarez-González, J.G., Ruíz-González, A.D.** (2012). Post-thinning soil organic matter evolution and soil CO₂ effluxes in temperate radiata pine plantations: impacts of moderate thinning regimes on the forest C cycle. - *Canadian journal of forest research*. Vol. 42, No. 11, pp. 1953–1964.
- Finér, L., Helmisaari, H.-S., Lõhmus, K., Majdi, H., Brunner, I., Borja, Eldhuset, T., Godbold, D., Grebenc, T., Konopka, B., Kraigher, H., Möttönen, M.-R., Ohashi, M., Oleksyn, J., Ostonen, I., Uri, V., Vanguelova, E.** (2007). Variation in fine root biomass of three European tree species: Beech (*Fagus sylvatica* L.), Norway spruce (*Picea abies* L. Karst),

- and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). - *Plant biosystems*. Vol. 141, No. 3, pp. 394-405.
- Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E. A., Kucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. A., Prentice, C., Ramankutty, N., Snyder, P. K.** (2005). Global consequences of land use. – *Science*. Vol. 309, No. 5734, pp. 570-574.
- Garkoti, S. C.** (2011). Fine root Dynamics in three central Himalayan high elevation forests ranging from closed canopied to open canopied treeline vegetation. – *Journal of Forest Research*. Vol. 16, No. 2, pp 136-143.
- Hansson, K., Helmisaari, H. S., Sah, S. P., Lange, H.** (2013). Fine root production and turnover of tree and understorey vegetation in Scots pine, silver birch and Norway spruce stands in SW Sweden. – *Forest Ecology and Management*. Vol 309, pp. 58-65.
- Hansson, K.** (2011). Impact of tree species on carbon in forest soils. Doctoral Thesis. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala.
- Helmisaari, H. S., Derome, J., Nöjd, P., Kukkola, M.** (2007). Fine root biomass in relation to site and stand characteristics in Norway spruce and Scots pine stands. – *Tree Physiology*. Vol. 27, No. 10, pp. 1493-1504.
- Helmisaari, H. S., Makkonen, K., Kellomäki, S., Valtonen, E., Mälikönen, E.** (2002). Below- and above-ground biomass, production and nitrogen use in Scots pine stands in eastern Finland. - *Forest Ecology and Management*. Vol. 165, No. 1-3, pp. 317–326.
- Jandl, R., Lindner, M., Vesterdal, L., Bauwens, B., Baritz, R., Hagedorn, F., Johnson, D.W., Minkinen, K., Byrne, K.A.** (2007). How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? - *Geoderma*. Vol. 137, No. 3-4, pp. 253–268.
- Karu, H.** (2005). Süsiniku akumulatsioon Narva karjääri männikultuuride aegreas. Magistritöö. Tartu Ülikool, Loodus- ja tehnoloogiateaduskond, Tartu Ülikooli Ökoloogia- ja Maateaduste Instituut, Ökofüsioloogia õppetool.
- Kasuk, K.** (2017). Puude varisevood kuusikute ja männikute metsaökosüsteemides. Bakalaureusetöö. Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut, Tartu.
- Kramer, P. J., Boyer, J. S.** (1995). *Water relations of plants and soils*. Academic press.
- Laas, E., Uri, V., Valgepea, M.** (2011).. Metsamajanduse alused: õpik kõrgkoolidele. Lohkva: Greif. 862 lk.
- Laganière, J., Cavard, X., Brassard, B.W., Paré, D., Bergeron, Y., Chen, H. Y. H.** (2015). The influence of boreal tree species mixtures on ecosystem carbon storage and fluxes. - *Forest Ecology and Management*. Vol. 354, pp. 119-129.
- Li DJ, Niu SL, Luo YQ.** (2012). Global patterns of the dynamics of soil carbon and nitrogen stocks

- following afforestation: a meta-analysis. - *New Phytologist*. Vol. 195, No. 1, pp. 172-181.
- Lõhmus, E.** (2004). Eesti metsakasvukohatüübid (kordustrükk). Tallinn: Kirjastus Eesti Loodusfoto. 80 lk.
- Makkonen, K., Helmisaari H. S.** (1999). Assessing fine-root biomass and production in a Scots pine stand—comparison of soil core and root ingrowth core methods. - *Plant Soil*. Vol. 210, No. 1, pp. 43–50.
- Makkonen, K., Helmisaari, H. S.** (2001). Fine root biomass and production in Scots pine stands in relation to stand age. – *Tree Physiology*. Vol. 21, No. 2-3, pp. 193-198.
- Metsaseadus.** (vastu võetud 07.06.2006, muudetud, täiendatud, viimati jõustunud 01.09.2017). – *Riigi Teataja* <https://www.riigiteataja.ee/akt/130122015032> (24.01.2018).
- Meyer, A., Tarvainen, L., Noursratpour, A., Björk, R. G., Ernfors, M., Grelle, A., Klemedtsson, Å. K., Lindroth, A., Rantfors, M., Rütting, T., Wallin, G., Weslien, P., Klemedtsson, L.** (2013). A fertile peatland forest does not constitute a major greenhouse gas sink. - *Biogeosciences*. Vol. 10, No. 11, pp. 7739–7758.
- Möll, H.** (2015). Biomassi produktsioon ja süsiniku bilanss 40-aastases sookaasikus (*Betula pubescens*) jänesekapsa-kõdusoo kasvukohatüübis. Magistritöö. Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut, Tartu.
- Neumann, M., Moreno, A., Mues, V., Härkönen, S., Mura, M., Bouriaud, O., Lang, M., Achten, W. M. J., Thivolle-Cazat, A., Bronisz, K., Merganič, J., Decuyper, M., Alberdi, I., Astrup, R., Mohren, F., Hasenauer, H.** (2016). Comparison of carbon estimation methods for European forests. - *Forest Ecology and Management*. Vol. 361, No. 1, pp. 397-420.
- Ostonen, I., Lõhmus, K., Pajuste, K.** (2005). Fine root biomass, production and its proportion of NPP in a fertile middle-aged Norway spruce forest: Comparison of soil core and ingrowth core methods. - *Forest Ecology and Management*. Vol. 212, No. 1-3, pp. 264–277.
- Persson, H.** (1980). Fine-root production, mortality and decomposition in forest ecosystems. - *Vegetatio*. Vol. 41, No. 2, pp. 101–109.
- Pukkala, T., Miina, J. & Palahí, M.** (2002). Thinning response and thinning bias in a young Scots pine stand. - *Silva Fennica*. Vol. 36, No. 4, pp. 827–840.
- Saarmann, E., Veibri, U.** (2006). Puiduteadus, Tartu 2006, Vali Press OÜ, 560 lk.
- Silm, D.** (2018). Hariliku männi (*pinus sylvestris* L.) maaalune biomass ning sellesse seotud süsinikuvaru mustika kasvukohatüübis. Magistritöö. Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut, Tartu.
- Scott, N., Rodrigues, C., Hughes, H., Lee, J., Davidson, E., Dail, D., Malerba, P., Hollinger, D.Y.** (2004). Changes in carbon storage and net carbon exchange one year after an initial shelterwood harvest at Howland forest, ME. - *Environmental Management*. Vol. 33, No. 1,

pp. 9-22.

- Somogyi, Z., Bidlo, A., Csiha, I., Illes, G.** (2013). Country-level carbon balance of forest soils: a country-specific model based on case studies in Hungary. - *European Journal of Forest Research*. Vol. 132, No. 5-6, pp. 825-840.
- Tassissa, G., Burkhart, H., E.** (1997). Modeling thinning effects on ring width distribution on loblolly pine (*Pinus taeda*). - *Canadian Journal of Forest Research*. Vol. 27, No. 8, pp. 1291-1301.
- Uri, M.** (2016). Süsiniku varud erineva vanusega palumännikutes. Bakalaureusetöö. Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut, Tartu.
- Uri, V.** (1994). Harvendusraie mõju puude diameetri juurdekasvule keskealise männiku näitel. Eesti Põllumajandusülikool. Teadustööde kogumik, 173, lk 144-149.
- Uri, V., Aosaar, J., Varik, M., Becker, H., Ligi, K., Padari, A., Kanal, A., Lõhmus, K.** (2014). The dynamics of biomass production, carbon and nitrogen accumulation in grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench) chronosequence stands in Estonia. - *Forest Ecology and Management*. Vol. 327, pp. 106-117.
- Uri, V., Kukumägi, M., Aosaar, J., Varik, M., Becker, H., Morozov, G., Karoles, K.** (2017). Ecosystems carbon budgets of differently aged downy birch stands growing on well-drained peatlands. - *Forest Ecology and Management*. Vol. 399, pp. 82–93.
- Uri, V., Lõhmus, K., Kiviste, A., Aosaar, J.** (2009). The dynamics of biomass production in relation to foliar and root traits in a grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench) plantation on abandoned agricultural land. – *Forestry*. Vol. 82, No. 1, pp. 61–74.
- Uri, V., Varik, M., Aosaar, J., Kanal, A., Kukumägi, M., Lõhmus, K.** (2011). Biomass production and carbon sequestration in a fertile silver birch (*Betula pendula* Roth.) forest chronosequence. – *Forest Ecology and Management*. Vol. 267, pp. 117–126.
- Varik, M., Aosaar, J., Ostonen, I., Lõhmus, K., Uri, V.** (2013). Carbon and nitrogen accumulation in belowground tree biomass in a chronosequence of silver birch stands. *Forest Ecology and Management*. Vol. 302, pp. 62–70.
- Varik, M., Aosaar, J., Uri, V.** (2009). Biomassi produktsioon jänesekapsa kasvukohatüübi arukaasikutes. – *Metsanduslikud uurimused*. 51, lk 5-16
- Varik, M., Kukumägi, M., Aosaar, J., Becker, H., Ostonen, I., Lõhmus, K., Uri, V.** (2015). Carbon budgets in fertile silver birch (*Betula pendula* Roth) chronosequence stands. – *Ecological Engineering*. – Vol. 77, pp. 284–296.
- Vesala, T., Suni, T., Rannik, Ü., Keronen, P., Markkanen, T., Sevanto, S., Grönholm, T., Smolander, S., Kulmala, M., Ilvesniemi, H., Ojansuu, R., Uotila, A., Levula, J., Mäkelä, A., Pumpanen, J., Kolari, P., Kulmala, L., Altimir, N., Berninger, F., Nikinmaa, E.,**

- Hari, P.** (2005). Effect of thinning on surface fluxes in a boreal forest. - *Global Biogeochem. Cycles*. Vol. 19, No. 2.
- Watson, R. T., Noble I. R., Bolin, B., Ravindranath, N. H., Verardo, D. J., Dokken D. J.** (2000). Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report. - *Land use, land use change, and forestry*. Cambridge university Press, pp. 375.
- Whittaker, R. H., Woodwell, G. M.** (1968). Dimension and production relations of trees and shrubs in the Brookhaven forest. New York.. – *Ecology*. Vol. 56, No. 1, pp. 1-25.

LISAD

Lisa 1. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Neeme Lõhmus,
sünniaeg 11.09.1991,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö
„Harvendusraie mõju puude jämeduskasvule ning süsinikuvarudele ja -voogudele
palumännikus“, mille juhendajad on teadur Jürgen Aosaar, professor Veiko Uri ning dotsent
Maris Hordo,
- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks
kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega
isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
(allkiri)

Tartu, _____
(kuupäev)

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

Maris Hordo (digiallkirjastatud)
(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)